

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Проектирование системы электроснабжения производства моторвагонного подвижного состава

Студент

В.Д. Филимонов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., А.Н. Черненко

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Аннотация

Работа выполнена на тему «Проектирование системы электроснабжения производства моторвагонного подвижного состава».

При выполнении работы был произведен укрупненный расчет электрических нагрузок в целом по предприятию по методу расчетного коэффициента. Исходя из категории надежности электроснабжения потребителей были выбраны число и номинальная мощность трансформаторов на цеховых трансформаторных подстанциях, решены вопросы компенсации реактивной мощности и выбраны номинальные мощности компенсирующих устройств для размещения на ТП.

Выполнен расчет оптимального напряжения схемы внешнего электроснабжения предприятия. По технико-экономическим показателям определены номинальные мощности силовых трансформаторов для установки на главной понизительной подстанции предприятия. Рассмотрены преимущества и недостатки типовых схем, применяемых для внутризаводского электроснабжения и выбрана оптимальная для существующего состава и расположения объектов на плане предприятия.

Произведен расчет максимальных значений трехфазных токов короткого замыкания и ударных токов. Выбрано основное электрооборудование для размещения в открытом распределительном устройстве высокого напряжения подстанции и закрытом распределительном устройстве низкого напряжения. Выбранные аппараты были проверены на стойкость к электродинамическим и термическим воздействиям во время протекания токов короткого замыкания. Определены параметры системы заземления подстанции.

Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки в 59 страниц, включающей в себя 2 графических рисунка, 4 таблицы со справочными данными и результатами расчетов и графической части, выполненной на листах формата А1.

Содержание

Введение.....	4
1 Характеристика предприятия.....	5
2 Определение максимальных нагрузок по методу расчетного коэффициента	
3 Расчет количества и мощности трансформаторов 10/0,4 кВ.....	12
3.1 Определение номинальной мощности трансформаторов 10/0,4 кВ подстанции ремонтно-литейного цеха предприятия.....	12
4 Расчет количества и мощности трансформаторов на ГПП предприятия.....	21
4.1 Установка на ГПП предприятия трансформаторов типа ТРДН - 25000/110/10/10.....	22
4.2 Установка на ГПП предприятия трансформаторов типа ТРДН - 40000/110/10/10.....	27
5 Обоснование схемы внутреннего электроснабжения предприятия	32
6 Определение токов КЗ	33
6.1 Определение токов КЗ в точке К1	34
6.2 Определение токов КЗ в точке К2	35
7 Выбор и проверка электрических аппаратов на ГПП предприятия	37
7.1 Выбор и проверка электрооборудования для размещения на ОРУ подстанции	37
7.2 Выбор и проверка электрооборудования для размещения в ЗРУ подстанции	43
8 Определение параметров системы заземления подстанции.....	53
Заключение	56
Список используемых источников.....	57

Введение

Системы электроснабжения находятся в постоянном развитии, следуя за изменениями технологического процесса на предприятии. Основными задачами, которые решаются при модернизации существующих систем электроснабжения и проектировании новых, являются повышение надежности электроснабжения электроприемников во всех режимах работы, снижение всех видов потерь электрической энергии и мощности, внедрение мероприятий по энергосбережению [1-3].

«Выбор новых видов техники и используемых технологий в процессе проектирования электроснабжения требует учета уже накопленного опыта в зарубежных странах, определения возможностей отечественных производителей и строительных организаций. Стратегией развития ЕНЭС на период до 2020 г. намечен ряд прогрессивных электросетевых технологий, таких как: гибкие системы передачи электрической энергии; УШР с микропроцессорными системами управления; использование эффектов сверхпроводимости; применение накопителей электроэнергии; внедрение автоматизированных подстанций с системой дистанционного управления высоковольтными выключателями; использование силовых трансформаторов с повышенной устойчивостью к токам коротких замыканий; внедрение оборудования с элегазовой изоляцией и др» [4-6].

Большая часть электроприемников промышленного предприятия функционирует в сетях напряжением ниже 1000 В, но имеется и ряд высоковольтных электроприемников как правило достаточно большой мощности, способных оказывать влияние и на показатели качества электрической энергии и на функционирование других ЭП.

Цель ВКР заключается в проектировании надежной и экономичной системы электроснабжения производства моторвагонного подвижного состава с использованием современных электрических аппаратов, рассчитанных на максимальный срок эксплуатации.

1 Характеристика предприятия

«АО «ТВЗ» находится в Тверской области и на сегодняшний день является современным высокотехнологичным производством и единственным в России предприятием, выпускающим различные типы пассажирских вагонов локомотивной тяги для скоростей движения достигающих до 200 км/ч. Завод специализируется на выпуске одно- и двухэтажных пассажирских вагонов, вагонов для международного сообщения, различных типов грузовых вагонов и вагонов спецназначения, тележек для подвижного состава магистральных железных дорог, а также электропоездов нового поколения, участвует в производстве вагонов метро и низкопольных трамваев.

Предприятие стремится достичь уровня мировых стандартов в области производства и обслуживания железнодорожной техники, чтобы обеспечить максимальное удовлетворение запросов и ожиданий потребителей продукции, инвестиционную привлекательность предприятия и его востребованность как надежного и предпочтительного партнера для персонала, заказчиков и поставщиков» [2]. Предпринимаются усилия для сохранения лидирующих позиций как в Российской Федерации и СНГ, так и для освоения новых рынков Европы, Азии, Африки и Латинской Америки.

«Технологические мощности предприятия позволяют вести работы по изготовлению одновременно нескольких моделей пассажирских вагонов, включая двухэтажные, вагонов спецназначения и электропоездов. Возможность выполнять любые задачи по созданию новых моделей вагонов в необходимых заказчику количествах, обеспечивают уникальная конструкторская школа, современная производственная база и более чем вековой опыт в области производства пассажирского подвижного состава» [2].

В тоже время, ввиду высокой продолжительности эксплуатации элементов системы электроснабжения предприятия возникла необходимость проведения ее масштабной реконструкции.

2 Определение максимальных нагрузок по методу расчетного коэффициента

Правильный и точный расчет нагрузок электрических потребителей является важнейшим фактором при создании проекта электрического снабжения промышленных предприятий, а также их дальнейшего обслуживания и эксплуатации.

В первую очередь, определяются расчетные нагрузки электрических приемников по средней мощности, которая потребляется во время самой загруженной смены, и расчетному коэффициенту. Этот метод признан достаточно точным и используется для определения значений расчетной нагрузки на различных уровнях системы электрического снабжения отдельных цехов и всего промышленного предприятия в целом.

В первую очередь, рассчитывается нагрузки электрических приемников, рассчитанных на напряжение 0,4 кВ.

По предполагаемому к установке электрическому оборудованию цехов промышленного предприятия определяем по данным из справочной литературы коэффициенты мощности и использования, для групп электрических приемников цеха промышленного предприятия [1]. Если в справочной литературе нет достоверной информации по искомому производственному цеху промышленного предприятия, то принимаются данные по схожему цеху. Если схожего цехового производства найти не удастся, то данные коэффициенты принимаются из диапазонов 1 и 2 исходя из предполагаемого к установке электрооборудования и режима работы:

$$K_{\text{И}} = 0,2 \dots 0,9; \quad (1)$$

$$\cos \varphi = 0,5 \dots 0,9. \quad (2)$$

Для всех цехов промышленного объекта или предприятия рассчитываются активные и реактивные электронагрузки за смену, которая имеет наибольшую загрузку по формулам 3 и 4:

$$P_C = K_{И} \cdot P_{Н}. \quad (3)$$

$$Q_C = K_{И} \cdot P_{Н} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

По справочным данным определяются значения расчетного коэффициента, в зависимости от полученного эффективного числа ЭП и группового коэффициента использования:

$$K_P = f(K_{И}; n_{Э}). \quad (5)$$

Определив значение K_P по таблицам или графикам, затем определяем расчетные значения активной и реактивной мощности:

$$P_P = K_P \cdot P_C. \quad (6)$$

$$Q_P = 1,1 \cdot Q_C \text{ при } n_{Э} \leq 10. \quad (7)$$

$$Q_P = Q_C \text{ при } n_{Э} > 10. \quad (8)$$

Определим значение полной расчетной мощности как корень из суммы квадратов:

$$S_P = \sqrt{P_P^2 + Q_P^2}. \quad (9)$$

Потом определяем суммарные нагрузки ЭП напряжением 0,4 кВ. Определяется сумма электрических приемников, установленных на промышленном предприятии, их номинальные активные мощности, средние и расчетные реактивные и активные мощности. Так же по групповым значениям

находим $\operatorname{tg}\varphi$ и коэффициент использования для итогового значения нагрузки 0,4 кВ:

$$K_{\text{И}} = \frac{\sum P_{\text{С}}}{\sum P_{\text{Н}}}. \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum Q_{\text{С}}}{\sum P_{\text{С}}}. \quad (11)$$

Определяем суммарное расчетное значение полной мощности:

$$\sum S_{\text{P}} = \sqrt{\sum P_{\text{P}}^2 + \sum Q_{\text{P}}^2}. \quad (12)$$

Затем выполняется определение значений расчетной нагрузки, рассчитанной на номинальное напряжение 6-10 кВ.

Первоначально определяют суммарную мощность одноступенчатых электроприемников напряжением 6-10 кВ. В отличие от нагрузки на 0,4 кВ, для электроприемников рассчитанных на напряжение 6-10 кВ количество электрических приемников из исходных данных приравнивается к их эффективному количеству.

Далее производится расчет нагрузки за наиболее загруженную смену.

Так же учитывается нагрузка синхронных двигателей, которые предполагается в режиме перевозбуждения использовать с целью генерации реактивной мощности для потребителей с индуктивной нагрузкой. Полученное в результате расчетов значение реактивной мощности для таких СД записывают со знаком минус.

Затем рассчитывается итоговые нагрузки для нагрузки 6-10 кВ.

Определяется сумма электрических приемников, установленных на промышленном предприятии, их номинальные активные мощности, средние и расчетные реактивные и активные мощности. Далее также, как и для нагрузки 0,4 кВ определяются общие коэффициенты по формулам 10 и 11.

Далее производится расчет коэффициента одновременности. Данный коэффициент зависит от суммарного коэффициента использования и суммы оборудования рассчитанного на напряжение 6-10 кВ [1].

По формулам 13 и 14 находим расчетную активную и реактивную высоковольтные нагрузки:

$$P_P = K_0 \cdot P_C. \quad (13)$$

$$Q_P = K_0 \cdot Q_C. \quad (14)$$

По выражению 12 находим значение полной мощности по высоковольтным электроприемникам.

На заключительном этапе производится суммирование полученных расчетных значений по нагрузкам 0,4 и 6-10 кВ.

Полученные значения заносим в таблицу 1.

В результате произведенных в данном разделе расчетов были определены расчетные значения нагрузок по каждому из цехов предприятия и по заводу в целом.

Таблица 1 – Результаты определения максимальных мощностей по цехам по методу расчетного коэффициента

№ цеха на генплане	Сокр. наим.	P_n , кВт	$P_{н.э.}$, кВт	$n_о$	K_u	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	P_c , кВт	Q_c , квар	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА
1	ремонтно-литейный	4852	194.08	25	0.67	0.81	0.72	3250.8	2353.57	0.71	2308.10	2353.57	3296.45
2	агрегатный	6331	62.68	101	0.52	0.68	1.08	3292.1	3549.74	0.84	2765.38	3549.74	4499.78
3	ремонтно-механический	363	13.96	26	0.46	0.82	0.70	166.98	116.55	0.72	120.23	116.55	167.45
4	сварочно-сборочный	22201	300.01	74	0.67	0.81	0.72	14875	10769.08	0.77	11453.50	10769.08	15721.18
5	прессовый	934	30.13	31	0.26	0.69	1.05	242.84	254.74	0.81	196.70	254.74	321.84
6	электроцех	927	25.75	36	0.66	0.67	1.11	611.82	677.90	0.89	544.52	677.90	869.51
7	чугуно-литейный	10236	173.49	59	0.74	0.77	0.83	7574.6	6276.56	0.73	5529.49	6276.56	8364.83

Продолжение таблицы 1

№ цеха на генплане	Сокр. наим.	P_n , кВт	$P_{н.э.}$, кВт	$n_э$	K_u	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	P_C , кВт	Q_C , квар	K_M	P_P , кВт	Q_P , квар	S_P , кВА
8	кузнечный	19511	106.04	184	0.56	0.63	1.23	10926	13468.58	0.86	9396.50	13468.58	16422.44
Суммарная нагрузка по предприятию		65355	14...300	536	0.63	-	0.92	40940	37466.71	-	32314.40	37466.71	49477.01

3 Расчет количества и мощности трансформаторов 10/0,4 кВ

3.1 Определение номинальной мощности трансформаторов 10/0,4 кВ подстанции ремонтно-литейного цеха предприятия

«Найдем необходимую мощность силового трансформатора КТП по формуле» [11, 12]:

$$S_{HT} > \frac{P_{p\Sigma}}{K_3 N_T}, \quad (15)$$

$$S_{HT} > \frac{2308.1}{0.8 \cdot 2} = 1443 \text{ кВА.}$$

Используя данные производителей выбираем ближайшее большее стандартное значение мощности трансформатора $S_{HT} = 1600 \text{ кВА}$.

3.1.1 Установка на КТП трансформаторов типа ТМГ -1600/10/0,4

На основании справочных данных, представленных на сайте производителя силовых трансформаторов, необходимые исходные данные для расчетов: $\Delta P_{xx} = 2.15 \text{ кВт}$, $\Delta P_{кз} = 16.8 \text{ кВт}$, $i_{xx} = 0.51 \%$, $u_{кз} = 6 \%$, $K_T = 728 \text{ тыс. руб.}$

Определим потери активной и реактивной мощности в трансформаторах КТП:

$$\Delta P_{mp} = N_T \cdot (P_{xx} + K_3^2 \cdot P_{кз}), \quad (16)$$

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot (2.15 + 0.8^2 \cdot 16.8) = 25.8 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{mp} = N_T \cdot (i_0 + K_3^2 \cdot U_{кз}) \cdot \frac{S_H}{100}, \quad (17)$$

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot (0.51 + 0.8^2 \cdot 6) \cdot \frac{1600}{100} = 139.2 \text{ квар.}$$

Суммарное значение расчётной нагрузки по производственному цеху с учётом определенного значения потерь активной и реактивной мощности в силовых трансформаторах КТП:

$$P_p = P_{p\Sigma} + \Delta P_T, \quad (18)$$

$$P_p = 2308.1 + 25.8 = 2333.9 \text{ кВт},$$

$$Q_p = Q_{p\Sigma} + \Delta Q_T, \quad (19)$$

$$Q_p = 2353.6 + 139.2 = 2492.8 \text{ квар}.$$

Находим значение потребления реактивной мощности в период минимальных нагрузок на предприятии:

$$Q_{\min} = 50\% \cdot Q_p, \quad (20)$$

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 2492.8 = 1246.4 \text{ квар}.$$

«Рассчитаем экономически выгодное значение реактивной мощности в период максимальных нагрузок в энергосистеме» [10]:

$$Q'_{\text{э1}} = Q_p - 0,7 Q_{\text{сд}}, \quad (21)$$

$$Q'_{\text{э1}} = 2492.8 - 0.7 \cdot 0 = 2492.8 \text{ квар},$$

$$Q''_{\text{э1}} = \alpha \cdot P_p, \quad (22)$$

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 2333.9 = 653.5 \text{ квар}.$$

для данного цеха исходя из состава электроприемников принимаем в расчетах $\alpha = 0,28$; $Q_{\text{сд}} = 0$.

В дальнейших расчетах используем меньшее из найденных значений $Q_{\text{э1}} = 653.5 \text{ квар}$.

«Находим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок» [10]:

$$Q_{\varepsilon 2, \varepsilon} = Q_{\min} - Q_{\kappa \partial} = Q_{\min} - (Q_P - Q_{\varepsilon 1}), \quad (23)$$

$$Q_{\varepsilon 2, \varepsilon} = 1246.4 - (2492.8 - 653.5) = -592.9 \text{ квар};$$

$$Q_{\varepsilon 2, \varepsilon} = Q_{\min} + Q_{\kappa}, \quad (24)$$

$$Q_{\varepsilon 2, \varepsilon} = 1246.4 + 0 = 1246.4 \text{ квар};$$

В дальнейших расчетах используем большее из найденных значений по причине повышения напряжения во время минимальной нагрузки:

$$Q_{\varepsilon 2} = 1246.4 \text{ квар}.$$

Максимальная мощность КУ, необходимых для установки на КТП:

$$Q_{\text{ку max}} = 1,15 \cdot Q_P - Q_{\varepsilon 1}, \quad (25)$$

$$Q_{\text{ку max}} = 1,15 \cdot 2492.8 - 653.5 = 2213.2 \text{ квар}.$$

Из данной мощность определим значение постоянной компенсации, не нуждающейся в регулировании:

$$Q_{\text{ку min}} = Q_{\min} - Q_{\varepsilon 2}, \quad (26)$$

$$Q_{\text{ку min}} = 1246.4 - 1246.4 = 0.$$

Таким образом вся реактивная мощность КУ должна быть регулируемой.

«Найдем величину реактивной мощности, которую требуется передать в электрическую сеть напряжением 0,4 кВ через силовые трансформаторы» [10]:

$$Q_{\varepsilon \text{н}} = Q_{\varepsilon 1} - (Q_P - Q_{P\Sigma}), \quad (27)$$

$$Q_{эH} = 653.5 - (2492.8 - 2353.6) = 514.3 \text{ квар.}$$

«Найдем величину реактивной мощности, которую целесообразно передать в электрическую сеть напряжением 0,4 кВ через силовые трансформаторы» [10]:

$$Q_T = \sqrt{(N_T K_3 S_H)^2 - P_{P\Sigma}^2}, \quad (28)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0.8 \cdot 1600)^2 - 2308.1^2} = 1107.4 \text{ квар,}$$

$$Q_{KVH} = Q_{P\Sigma} - Q_T, \quad (29)$$

$$Q_{KVH} = 2353.6 - 1107.4 = 1246.2 \text{ квар,}$$

$$Q_{KVB} = Q_{KV \max} - Q_{KVH}, \quad (30)$$

$$Q_{KVB} = 2213.2 - 1246.2 = 967 \text{ квар.}$$

В результате расчетов выбираем двухтрансформаторную подстанцию с СТ типа ТМГ -1600/10/0,4 и 2 автоматические низковольтные КУ типа АУКРМ 600 квар и 2 высоковольтные КУ типа УКРП57 мощность по 450 квар каждая [13].

«Определим продолжительность периода максимальных потерь» [10]:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot T_P, \quad (31)$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4690}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 3080 \text{ ч.}$$

Находим стоимость потерь холостого хода в силовом трансформаторе КТП за год:

$$C_{XX} = \left(\frac{\alpha \cdot 12}{T_M} + \beta \right) \cdot T_P , \quad (32)$$

$$C_{XX} = \left(\frac{615 \cdot 12}{4690} + 1.433 \right) \cdot 8760 = 26.339 \text{ тыс.руб/кВт} .$$

Находим стоимость потерь короткого замыкания в силовом трансформаторе КТП за год::

$$C_{KЗ} = \left(\frac{\alpha \cdot 12}{T_M} + \beta \right) \cdot \tau , \quad (33)$$

$$C_{KЗ} = \left(\frac{615 \cdot 12}{4690} + 1.433 \right) \cdot 3080 = 9.261 \text{ тыс.руб/кВт} .$$

Значение $C \cdot \Delta P_T$, находим из выражения:

$$C \cdot \Delta P_T = C_{XX} \cdot \Delta P_{XX} + C_{KЗ} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{KЗ} , \quad (34)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 26.339 \cdot 2.15 + 9.261 \cdot 0.8^2 \cdot 16.8 = 156.199 \text{ тыс.руб.}$$

Суммарные приведенные затраты на КТП составят:

$$Z_{КТП} = E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{KV6} \cdot N_{KV6} + K_{KVH} \cdot N_{KVH}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T , \quad (35)$$

$$Z_{КТП} = 0.223 \cdot (728 \cdot 2 + 216 \cdot 2 + 187.6 \cdot 2) + (156.199 \cdot 2) = 817.091 \text{ тыс.руб.}$$

3.1.2 Установка на КТП трансформаторов типа ТМГ -2000/10/0,4

На основании справочных данных, представленных на сайте производителя силовых трансформаторов, необходимые исходные данные для расчетов: $\Delta P_{XX} = 2.6 \text{ кВт}$, $\Delta P_{KЗ} = 23.3 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.51 \%$, $u_{KЗ} = 6 \%$, $K_T = 918 \text{ тыс. руб.}$

Определим потери активной и реактивной мощности в трансформаторах КТП:

$$\Delta P_{mp} = N_T \cdot (P_{xx} + K_3^2 \cdot P_{кз}), \quad (36)$$

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot (2.6 + 0.8^2 \cdot 23.3) = 35.02 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{mp} = N_T \cdot (i_0 + K_3^2 \cdot U_{кз}) \cdot \frac{S_H}{100}, \quad (37)$$

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot (0.51 + 0.8^2 \cdot 6) \cdot \frac{2000}{100} = 174 \text{ квар}.$$

Суммарное значение расчётной нагрузки по производственному цеху с учётом определенного значения потерь активной и реактивной мощности в силовых трансформаторах КТП:

$$P_p = P_{p\Sigma} + \Delta P_T, \quad (38)$$

$$P_p = 2308.1 + 35.02 = 2343.1 \text{ кВт},$$

$$Q_p = Q_{p\Sigma} + \Delta Q_T, \quad (39)$$

$$Q_p = 2353.6 + 174 = 2527.6 \text{ квар}.$$

Находим значение потребления реактивной мощности в период минимальных нагрузок на предприятии:

$$Q_{\min} = 50\% \cdot Q_p, \quad (40)$$

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 2527.6 = 1263.8 \text{ квар}.$$

«Рассчитаем экономически выгодное значение реактивной мощности в период максимальных нагрузок в энергосистеме» [10]:

$$Q'_{\text{эл}} = Q_p - 0,7 Q_{\text{сд}}, \quad (41)$$

$$Q'_{\text{э1}} = 2527.6 - 0.7 \cdot 0 = 2527.6 \text{ квар},$$

$$Q''_{\text{э1}} = \alpha \cdot P_p, \quad (42)$$

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 2343.1 = 656.1 \text{ квар}.$$

для данного цеха исходя из состава электроприемников принимаем в расчетах $\alpha = 0,28$; $Q_{CD} = 0$.

В дальнейших расчетах используем меньшее из найденных значений $Q_{\text{э1}} = 656.1 \text{ квар}$.

«Находим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок» [10]:

$$Q_{\text{э2,в}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{кд}} = Q_{\text{min}} - (Q_p - Q_{\text{э1}}), \quad (43)$$

$$Q_{\text{э2,в}} = 1263.8 - (2527.6 - 656.1) = -607.7 \text{ квар};$$

$$Q_{\text{э2,н}} = Q_{\text{min}} + Q_{\text{к}}, \quad (44)$$

$$Q_{\text{э2,н}} = 1263.8 + 0 = 1263.8 \text{ квар};$$

В дальнейших расчетах используем большее из найденных значений по причине повышения напряжения во время минимальной нагрузки: $Q_{\text{э2}} = 1263.8 \text{ квар}$.

Максимальная мощность КУ, необходимых для установки на КТП:

$$Q_{\text{ку max}} = 1,15 \cdot Q_p - Q_{\text{э1}}, \quad (45)$$

$$Q_{\text{ку max}} = 1,15 \cdot 2527.6 - 656.1 = 2250.6 \text{ квар}.$$

Из данной мощность определим значение постоянной компенсации, не нуждающейся в регулировании:

$$Q_{\text{ку min}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{э2}}, \quad (46)$$

$$Q_{\text{квmin}} = 1263.8 - 1263.8 = 0.$$

Таким образом вся реактивная мощность КУ должна быть регулируемой.

«Найдем величину реактивной мощности, которую требуется передать в электрическую сеть напряжением 0,4 кВ через силовые трансформаторы» [10]:

$$Q_{\text{эн}} = Q_{\text{э1}} - (Q_p - Q_{p\Sigma}), \quad (47)$$

$$Q_{\text{эн}} = 656.1 - (2527.6 - 2353.6) = 482.1 \text{ квар.}$$

«Найдем величину реактивной мощности, которую целесообразно передать в электрическую сеть напряжением 0,4 кВ через силовые трансформаторы» [10]:

$$Q_T = \sqrt{(N_T K_3 S_H)^2 - P_{p\Sigma}^2}, \quad (48)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0.8 \cdot 2000)^2 - 2308.1^2} = 2216.5 \text{ квар,}$$

$$Q_{\text{КВН}} = Q_{p\Sigma} - Q_T, \quad (49)$$

$$Q_{\text{КВН}} = 2353.6 - 2216.5 = -137.1 \text{ квар ,}$$

$$Q_{\text{.КВВ}} = Q_{\text{КВ max}} - Q_{\text{КВН}}, \quad (50)$$

$$Q_{\text{.КВВ}} = 2250.6 - 137.1 = 2113.5 \text{ квар .}$$

В результате расчетов выбираем двухтрансформаторную подстанцию с СТ типа ТМГ -2000/10/0,4, и 2 автоматические низковольтные КУ типа АУКРМ 75 квар и 2 высоковольтные КУ типа УКРП57 мощность по 900 квар каждая.

Значение $C \cdot \Delta P_T$, находим из выражения:

$$C \cdot \Delta P_T = C_{\text{XX}} \cdot \Delta P_{\text{XX}} + C_{\text{КЗ}} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{\text{КЗ}}, \quad (51)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 26.339 \cdot 2.6 + 9.261 \cdot 0.8^2 \cdot 23.3 = 206.575 \text{ тыс.руб.}$$

Суммарные приведенные затраты на КТП составят:

$$Z_{\text{КТП}} = E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{\text{КУ}} \cdot N_{\text{КУ}}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T, \quad (52)$$

$$Z_{\text{КТП}} = 0.223 \cdot (918 \cdot 2 + 38.2 \cdot 2 + 218 \cdot 2) + (206.575 \cdot 2) = 936.843 \text{ тыс.руб.}$$

Сопоставляя полученные значения приведенных затрат 937 тыс. руб. во втором варианте и 817 тыс. руб. в первом варианте принимаем для дальнейшей реализации вариант с меньшим значением приведенных затрат и установкой двухтрансформаторной подстанции с СТ типа ТМГ -1600/10/0,4 и 2 автоматическими низковольтными КУ типа АУКРМ 600 квар и 2 высоковольтными КУ типа УКРП57 мощность по 450 квар каждая.

Все КТП выбираем комплектными, производства группы компаний Электроцит-Самара.

4 Расчет количества и мощности трансформаторов на ГПП предприятия

Находим рациональное напряжение для системы внешнего электроснабжения [14]:

$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{L + 0.016 \cdot P_{PI}}, \quad (53)$$
$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{11 + 0.016 \cdot 32314} = 100 \text{ кВ},$$

где суммарная расчетная нагрузка складывается из нагрузки высоковольтных и низковольтных потребителей предприятия и мощности сторонней нагрузки:

$$P_{PI} = P_{PH} + P_{PB} + P_{CTOP}, \quad (54)$$
$$P_{PI} = 32314.4 + 0 + 0 = 32314 \text{ кВт}.$$

Находим значение полной расчетной нагрузки предприятия:

$$S_{PI} = \sqrt{P_{PI}^2 + Q_{ЭС}^2}, \quad (55)$$
$$S_{PI} = \sqrt{32314^2 + 8079^2} = 33309 \text{ кВА},$$

при этом расчетную реактивную нагрузку определяем из выражения:

$$Q_{ЭС} = P_{PI} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (56)$$
$$Q_{ЭСi} = 32314 \cdot 0.25 = 8079 \text{ квар}.$$

Исходя из категории надежности электроснабжения потребителей предприятия, среди которых присутствуют представители 1й и 2й категорий

выбираем к установке на ГПП предприятия два силовых трансформатора. Номинальную мощность каждого определяем по формуле:

$$S_{номт} \approx K_{1-2} \cdot S_{ПП} \frac{1}{K_{пер}}, \quad (57)$$

$$S_{номт} \approx 0,8 \cdot 33309 \cdot \frac{1}{1,4} = 19034 \text{ кВА.}$$

Принимаем для дальнейшего рассмотрения силовые трансформаторы с номинальной мощностью ближайшей большей полученного расчетного значения, а именно трансформаторы типа ТРДН-25000/110/10/10 и ТРДН-40000/110/10/10.

4.1 Установка на ГПП предприятия трансформаторов типа ТРДН - 25000/110/10/10

На основании справочных данных, представленных на сайте производителя силовых трансформаторов, необходимые исходные данные для расчетов: $\Delta P_{XX} = 27 \text{ кВт}$, $\Delta P_{КЗ} = 123 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.61 \%$, $u_{КЗ} = 10.5 \%$, $K_T = 30000 \text{ тыс. руб.}$

Определим приведенные потери активной мощности в СТ в режиме XX [15, 16]:

$$\Delta P_x' = \Delta P_x + K_{um} \cdot \Delta Q_x, \quad (58)$$

$$\Delta P_x' = 27 + 0.05 \cdot 152.5 = 34.63 \text{ кВт},$$

где потери реактивной мощности определяем из выражения:

$$\Delta Q_x = I_{xx\%} \cdot S_{ном.т} / 100, \quad (59)$$

$$\Delta Q_x = 0.61 \cdot 25000 / 100 = 152.5 \text{ квар},$$

$$K_{un} = 0,05 \text{ кВт} / \text{квар}.$$

Определим приведенные потери активной мощности в СТ в режиме КЗ:

- в обмотках ВН СТ:

$$\Delta Q_{к.в} = U_{к.в\%} \cdot S_{ном\ m} / 100, \quad (60)$$

$$\Delta Q_{к.в} = 1.3 \cdot 25000 / 100 = 328.1 \text{ квар},$$

$$U_{к.в\%} = 0,125 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (61)$$

$$U_{к.в\%} = 0,125 \cdot 10.5 = 1.3 \%,$$

$$\Delta P'_{к.в} = \Delta P_{к.в} + K_{un} \cdot \Delta Q_{к.в}, \quad (62)$$

$$\Delta P'_{к.в} = 0 + 0.05 \cdot 328.1 = 16.4 \text{ кВт}.$$

$$\Delta P_{к.в} = 0.$$

- в обмотках НН СТ:

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = U_{к.н1,2\%} \cdot S_{ном\ m} / 100, \quad (63)$$

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = 18.375 \cdot 25000 / 100 = 4593.8 \text{ квар},$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1,75 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (64)$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1,75 \cdot 10.5 = 18.375 \%,$$

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = \Delta P_{к.н1,2} + K_{un} \cdot \Delta Q_{к.н1,2}, \quad (65)$$

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = 246 + 0.05 \cdot 4593.8 = 475.7 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot \Delta P_{к.ВН-НН}, \quad (66)$$

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot 123 = 246 \text{ кВт}.$$

Определяем коэффициенты загрузки обмоток ВН и НН трансформатора ГПП при прохождении по ним полной мощности потребителей подстанции:

$$K_{3.6} = \frac{S_B}{S_{ном,Т}}, \quad (67)$$

$$K_{3.6} = \frac{33309}{25000} = 1.33.$$

$$K_{3.н1} = K_{3.н2} = \frac{S_{н1,2}}{S_{ном,Т}}, \quad (68)$$

$$K_{3.н1} = K_{3.н2} = \frac{16654.5}{25000} = 0.67.$$

Определяем общие потери активной мощности в силовом трансформаторе с учетом загрузки его обмоток:

$$P_m^{\dot{}} = \Delta P_x^{\dot{}} + K_{3.6}^2 \cdot \Delta P_{к.6}^{\dot{}} + K_{3.н1}^2 \cdot \Delta P_{к.н1}^{\dot{}} + K_{3.н2}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}^{\dot{}}, \quad (69)$$

$$P_m^{\dot{}} = 34.63 + 1.33^2 \cdot 16.4 + 0.67^2 \cdot 475.7 + 0.67^2 \cdot 475.7 = 486 \text{ кВт}.$$

Находим потери электрической энергии используя значения мощности для каждой ступени годового графика нагрузки и их продолжительности (рисунок 1):

$$\begin{aligned} \Delta W_{nc} = & \sum \Delta W_{xi} + \sum \Delta W_{ki} = \sum n_i \cdot \Delta P_x' \cdot T_i + \\ & + \sum \left(\frac{1}{n_i} \cdot K_{3.6i}^2 \cdot \Delta P_{к.6}' \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н1i}^2 \cdot \Delta P_{к.н1}' \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н2i}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}' \cdot T_i \right) \end{aligned} \quad (70)$$

Расчетные данные по потерям в силовых трансформаторах подстанции предприятия заносим в таблицу 2.

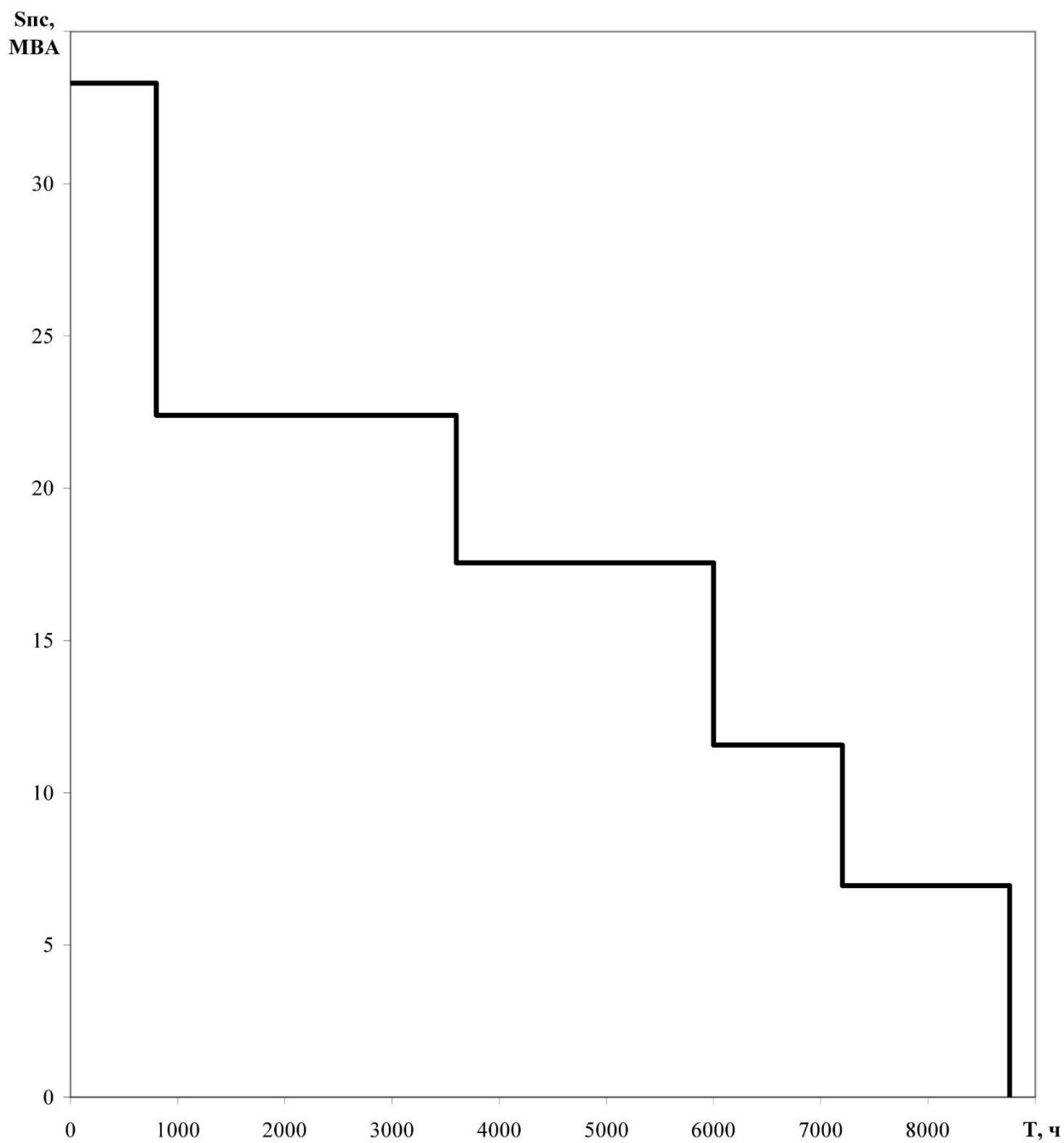


Рисунок 1 – Упорядоченный годовой график нагрузки подстанции

Таблица 2 - Расчетные данные по потерям в силовых трансформаторах подстанции

i	S_{Bi} , <i>MBA</i>	S_{H1i} , <i>MBA</i>	S_{H2i} , <i>MBA</i>	n_i	T_i , ч	ΔW_{xi} , <i>кВт·ч</i>	$K_{зBi}$	$K_{зH1i}$	$K_{зH2i}$	$\Delta W_{кBi}$, <i>кВт·ч</i>	$\Delta W_{кH1i}$, <i>кВт·ч</i>	$\Delta W_{кH2i}$, <i>кВт·ч</i>
1	33.309	16.655	16.655	2	800	55400	1.332	0.666	0.666	11650	84443	84443
2	22.397	11.199	11.199	2	2800	193900	0.896	0.448	0.448	18435	13362 9	13362 9
3	17.554	8.777	8.777	2	2400	166200	0.702	0.351	0.351	9707	70361	70361
4	11.563	5.782	5.782	2	1200	83100	0.463	0.231	0.231	2106	15265	15265
5	6.948	3.474	3.474	2	1560	108030	0.278	0.139	0.139	988	7164	7164
$\Sigma \Delta W_{xi} = 606630$										$\Sigma \Delta W_{кBi} = 664611$		

Находим стоимость потерь электрической энергии в силовых трансформаторах ГПП за год:

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = \Delta W_{nc} \cdot C_{\text{э}}, \quad (71)$$

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (664611 + 606630) \cdot 3.007 = 3823 \text{ тыс. руб.}$$

Рассчитаем суммарные приведенные затраты на установку трансформаторов на главной понизительной подстанции предприятия:

$$Z_{\text{прив}} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_{\text{э}} + I_{\Delta W_{ПТС}}, \quad (72)$$

$$Z_{\text{прив}} = 0.25 \cdot 60000 + 5640 + 3823 = 24462 \text{ тыс. руб.}$$

где $K = 2 \cdot 30000 = 60000 \text{ тыс. руб.}$ – суммарные затраты на покупку, доставку и монтаж новых силовых трансформаторов рассматриваемой мощности;

$I_{\text{э}} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 60000 = 5640 \text{ тыс. руб.}$ – суммарные отчисления на эксплуатацию за год.

4.2 Установка на ГПП предприятия трансформаторов типа ТРДН - 40000/110/10/10

На основании справочных данных, представленных на сайте производителя силовых трансформаторов, необходимые исходные данные для расчетов: $\Delta P_{XX} = 36 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 173 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.51\%$, $u_{K3} = 10.5\%$, $K_T = 40304 \text{ тыс. руб.}$

Определим приведенные потери активной мощности в СТ в режиме XX:

$$\Delta P_x' = \Delta P_x + K_{un} \cdot \Delta Q_x, \quad (73)$$

$$\Delta P_x' = 36 + 0.05 \cdot 204 = 46.2 \text{ кВт},$$

где потери реактивной мощности определяем из выражения

$$\Delta Q_x = I_{xx\%} \cdot S_{ном.т} / 100, \quad (74)$$

$$\Delta Q_x = 0.51 \cdot 40000 / 100 = 204 \text{ квар},$$

$$K_{un} = 0,05 \text{ кВт} / \text{квар}.$$

Определим приведенные потери активной мощности в СТ в режиме КЗ:

- в обмотках ВН СТ:

$$\Delta Q_{к.в} = U_{к.в\%} \cdot S_{ном.т} / 100, \quad (75)$$

$$\Delta Q_{к.в} = 1.3 \cdot 40000 / 100 = 525 \text{ квар},$$

$$U_{к.в\%} = 0,125 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (76)$$

$$U_{к.в\%} = 0,125 \cdot 10.5 = 1.3 \%,$$

$$\Delta P'_{к.в} = \Delta P_{к.в} + K_{un} \cdot \Delta Q_{к.в}, \quad (77)$$

$$\Delta P'_{к.в} = 0 + 0.05 \cdot 525 = 26.3 \text{ кВт}.$$

$$\Delta P_{к.в} = 0.$$

- в обмотках НН СТ:

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = U_{к.н1,2\%} \cdot S_{ном.т} / 100, \quad (78)$$

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = 18.375 \cdot 40000 / 100 = 7350 \text{ квар},$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1,75 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (79)$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1,75 \cdot 10.5 = 18.375 \%,$$

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = \Delta P_{к.н1,2} + K_{un} \cdot \Delta Q_{к.н1,2}, \quad (80)$$

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = 346 + 0.05 \cdot 7350 = 713.5 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot \Delta P_{к.ВН-НН}, \quad (81)$$

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot 173 = 346 \text{ кВт}.$$

Определяем коэффициенты загрузки обмоток ВН и НН трансформатора ГПП при прохождении по ним полной мощности потребителей подстанции:

$$K_{3.6} = \frac{S_B}{S_{ном,Т}}, \quad (82)$$

$$K_{3.6} = \frac{33309}{40000} = 0.83.$$

$$K_{3.н1} = K_{3.н2} = \frac{S_{Н1,2}}{S_{ном,Т}}, \quad (83)$$

$$K_{3.н1} = K_{3.н2} = \frac{16654.5}{40000} = 0.42.$$

Определяем общие потери активной мощности в силовом трансформаторе с учетом загрузки его обмоток:

$$P_m = \Delta P_x + K_{3.6}^2 \cdot \Delta P_{к.6} + K_{3.н1}^2 \cdot \Delta P_{к.н1} + K_{3.н2}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}, \quad (84)$$

$$P_m = 46.2 + 0.83^2 \cdot 26.3 + 0.42^2 \cdot 713.5 + 0.42^2 \cdot 713.5 = 311.8 \text{ кВт}.$$

Находим потери электрической энергии используя значения мощности для каждой ступени годового графика нагрузки и их продолжительности:

$$\Delta W_{nc} = \sum \Delta W_{xi} + \sum \Delta W_{ki} = \sum n_i \cdot \Delta P'_x \cdot T_i + \sum \left(\frac{1}{n_i} \cdot K_{3.6i}^2 \cdot \Delta P'_{к.6} \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н1i}^2 \cdot \Delta P'_{к.н1} \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н2i}^2 \cdot \Delta P'_{к.н2} \cdot T_i \right) \quad (85)$$

Расчетные данные по потерям в силовых трансформаторах подстанции предприятия заносим в таблицу 3.

Таблица 3 - Расчетные данные по потерям в силовых трансформаторах подстанции

i	S_{Bi} , <i>MBA</i>	S_{H1i} , <i>MBA</i>	S_{H2i} , <i>MBA</i>	n_i	T_i , ч	ΔW_{xi} , <i>кВт·ч</i>	$K_{зBi}$	$K_{зH1i}$	$K_{зH2i}$	$\Delta W_{кBi}$, <i>кВт·ч</i>	$\Delta W_{кH1i}$, <i>кВт·ч</i>	$\Delta W_{кH2i}$, <i>кВт·ч</i>
1	33.309	16.655	16.655	2	800	73920	0.833	0.416	0.416	7281	49476	49476
2	22.397	11.199	11.199	2	2800	258720	0.560	0.280	0.280	11522	78295	78295
3	17.554	8.777	8.777	2	2400	221760	0.439	0.219	0.219	6067	41225	41225
4	11.563	5.782	5.782	2	1200	110880	0.289	0.145	0.145	1316	8944	8944
5	6.948	3.474	3.474	2	1560	144144	0.174	0.087	0.087	618	4197	4197
$\Sigma \Delta W_{xi} = 809424$										$\Sigma \Delta W_{кBi} = 391080$		

Находим стоимость потерь электрической энергии в силовых трансформаторах ГПП за год:

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = \Delta W_{nc} \cdot C_{э}, \quad (86)$$

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (391080 + 809424) \cdot 3.007 = 3610 \text{ тыс. руб.}$$

Рассчитаем суммарные приведенные затраты на установку трансформаторов на главной понизительной подстанции предприятия:

$$Z_{прив} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_{э} + I_{\Delta W_{ПТС}}, \quad (87)$$

$$Z_{прив} = 0.25 \cdot 80608.78 + 7577 + 3610 = 31339 \text{ тыс.руб.}$$

где $K = 2 \cdot 40304.39 = 80608.78 \text{ тыс.руб.}$ – суммарные затраты на покупку, доставку и монтаж новых силовых трансформаторов рассматриваемой мощности;

$I_{э} = P_{сум} \cdot K = 0,094 \cdot 80608.78 = 7577 \text{ тыс.руб.}$ – суммарные отчисления на эксплуатацию за год.

Сопоставляя величину приведенных затрат на установку на ГПП силовых трансформаторов типа ТРДН- 25000/110/10/10 с величиной суммарных приведенных затрат 24462 тыс.руб. и трансформаторов типа ТРДН- 40000/110/10/10 с величиной суммарных приведенных затрат 31339 тыс.руб., выбираем для дальнейшего рассмотрения вариант с наименьшим значением приведенных затрат - ТРДН- 25000/110/10/10.

5 Обоснование схемы внутреннего электроснабжения предприятия

Для распределения электрической энергии по территории промышленного предприятия могут применяться радиальная, магистральная схемы или их комбинированный вариант - смешанная схема электроснабжения.

На предприятиях широкое распространение получили радиальные схемы, особенно при питании обособленных сосредоточенных нагрузок, а также ответственных потребителей к надежности питания которых предъявляются повышенные требования. Передача электроэнергии от ГПП предприятия к трансформаторным подстанциям может осуществляться напрямую или через высоковольтные распределительные пункты при необходимости электроснабжения относительно большого числа высоковольтных электроприемников напряжением 6 или 10 кВ (как правило высоковольтных электродвигателей) или трансформаторных подстанций с трансформаторами небольшой мощности.

Применение магистральных схем распределения электрической энергии по территории предприятия нашло широкое применение ввиду их большей экономичности по сравнению с радиальными при питании большого числа равномерно распределенных по территории предприятия трансформаторных подстанций. Обеспечение надежности электроснабжения потребителей достигается питанием каждого из лучей магистральной схемы от разных секций ГПП, что позволяет обеспечить возможность электроснабжения от двух независимых источников питания.

Как правило в чистом виде такие схемы применяются редко, поэтому для электроснабжения рассматриваемого предприятия выбираем смешанную схему, то есть часть обособленных потребителей запитываем по радиальной схеме, а трансформаторные подстанции расположенные равномерно по территории предприятия с использованием магистральной схемы [14, 17-19].

6 Определение токов КЗ

Перед выбором и проверкой электрических аппаратов на ГПП производится расчет токов короткого замыкания, для этого составляется расчетная схема, на которой отмечаются все основные элементы и точки для расчета токов КЗ и ее схема замещения, на которой все элементы представляются своими сопротивлениями (рисунок 2).

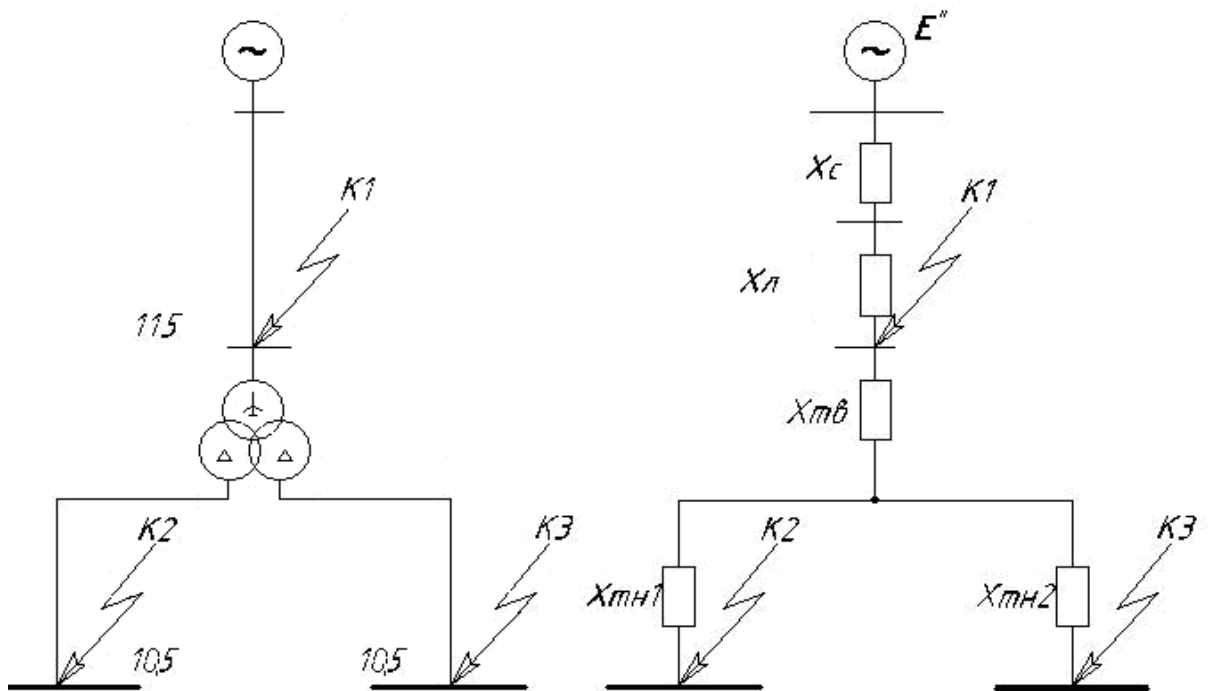


Рисунок 2 - Расчётная схема и ее схема замещения

Исходные данные для расчетов:

Внешняя электроэнергосистема: $U_{cp} = 115$ кВ; $S_{\sigma} = 1000$ МВА;

$S_k = 3600$ МВА.

ВЛ от подстанции энергосистемы до ГПП предприятия:

$x_{yo} = 0,4$ Ом/км; $L = 11$ км.

Номинальная мощность и напряжение короткого замыкания, выбранного трансформатора: $S_n = 25$ МВА; $U_k = 10.5$ %.

Найдем сопротивление системы [20]:

$$x_{c.\bar{b}} = \frac{S_{\bar{b}}}{S_k}; \quad (88)$$

$$x_{c.\bar{b}} = \frac{1000}{3600} = 0.278.$$

Найдем сопротивление воздушной линии электропередачи:

$$x_{ВЛ.\bar{b}} = \frac{x_{y\bar{d}}}{2} \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{b}}}{U_{сн}^2}; \quad (89)$$

$$x_{ВЛ.\bar{b}} = \frac{0.4}{2} \cdot 11 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0.166.$$

Найдем сопротивление силового трансформатора типа ТРДН-25000/110/10/10:

$$x_{Т.В.\bar{b}} = \frac{U_{к.в}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}}}{S_n}; \quad (90)$$

$$x_{Т.В.\bar{b}} = \frac{1.3125}{100} \cdot \frac{1000}{25} = 0.525.$$

$$x_{Т.Н.\bar{b}} = \frac{U_{к.н}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}}}{S_n}; \quad (91)$$

$$x_{Т.Н.\bar{b}} = \frac{18.375}{100} \cdot \frac{1000}{25} = 7.35.$$

6.1 Определение токов КЗ в точке К1

Найдем суммарное значение сопротивления до точки КЗ:

$$x_{рез1} = x_{с.б} + x_{БЛ.б}; \quad (92)$$

$$x_{рез1} = 0.278 + 0.166 = 0.444.$$

Рассчитаем базисный ток:

$$I_{б.к1} = \frac{S_{б}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}; \quad (93)$$

$$I_{б.к1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5.02 \text{ кА.}$$

Произведем расчет начального действующего значения трехфазного тока КЗ:

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{E_{б}}{x_{рез1}} \cdot I_{б}; \quad (94)$$

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{1}{0.444} \cdot 5.02 = 11.304 \text{ кА.}$$

Рассчитаем ударный ток короткого замыкания в расчетной точке:

$$i_{уд.к1} = \sqrt{2} \cdot I_{н.о}^{(3)} \cdot K_{уд}; \quad (95)$$

$$i_{уд.к1} = \sqrt{2} \cdot 11.304 \cdot 1.8 = 28.775 \text{ кА.}$$

6.2 Определение токов КЗ в точке К2

Найдем суммарное значение сопротивления до точки КЗ:

$$x_{рез2} = x_{рез1} + x_{Т.В.б} + x_{Т.Н.б}; \quad (96)$$

$$x_{рез2} = 0.444 + 0.525 + 7.35 = 8.319.$$

Рассчитаем базисный ток:

$$I_{\bar{o}.к2} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}; \quad (97)$$

$$I_{\bar{o}.к2} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 54.986 \text{ кА.}$$

Произведем расчет начального действующего значения трехфазного тока КЗ:

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{E_{\bar{o}}}{x_{рез2}} \cdot I_{\bar{o}.к2}; \quad (98)$$

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{1}{8.319} \cdot 54.986 = 6.610 \text{ кА.}$$

Рассчитаем ударный ток короткого замыкания в расчетной точке:

$$i_{уд.к2} = \sqrt{2} \cdot I_{н,о}^{(3)} \cdot \kappa_{уд}; \quad (99)$$

$$i_{уд.к2} = \sqrt{2} \cdot 6.610 \cdot 1.85 = 17.293 \text{ кА.}$$

Полученные в результате расчетов значения сводим в таблицу 4.

Таблица 4 – Полученные значения токов КЗ в точках К1 и К2

№ точки КЗ	$U_{сн}$, кВ	$\kappa_{уд}$	$I_{к}^{(3)}$, кА	$i_{уд}$, кА
1	115	1.8	11.3	28.8
2	10.5	1.85	6.6	17.3

В данном разделе были определены значения токов короткого замыкания на сторонах ВН и НН ГПП предприятия.

7 Выбор и проверка электрических аппаратов на ГПП предприятия

7.1 Выбор и проверка электрооборудования для размещения на ОРУ подстанции

7.1.1 Выбор и проверка выключателей 110 кВ

Предварительно для размещения на стороне ВН ГПП выбираем высоковольтный выключатель ВЭБ-УЭТМ-110 УХЛ1.

Условия выбора и проверки:

- соответствие напряжению сети:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (100)$$

$$110 \text{ кВ} \leq 110 \text{ кВ};$$

- соответствие номинального тока выбираемого аппарата максимальному току послеаварийного режима:

$$I_{max} < I_n, \quad (101)$$

$$176 \text{ А} < 2500 \text{ А},$$

где максимальное значение тока послеаварийного режима определяется по формуле:

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (102)$$

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 176 \text{ А};$$

- проверка на коммутационную способность:

$$I_{\kappa 1}^{(3)} \leq I_{откл.н}, \quad (103)$$

$$11.3 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА},$$

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.н}, \quad (104)$$

$$6.2 \text{ кА} \leq 23.2 \text{ кА},$$

где

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa 1}^{(3)} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}, \quad (105)$$

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 11.3 \cdot e^{\frac{-0.047}{0.05}} = 6.2 \text{ кА},$$

$$i_{a.н} = \left(\sqrt{2} \cdot \beta_n / 100 \right) \cdot I_{откл.н}, \quad (106)$$

$$i_{a.н} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{41}{100} \right) \cdot 40 = 23.2 \text{ кА},$$

- проверка на электродинамическую стойкость выбранного аппарата:

$$I_{\kappa 1}^{(3)} \leq I_{нр.с}, \quad (107)$$

$$11.3 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА};$$

$$i_{y\partial} \leq i_{нр.с}, \quad (108)$$

$$28.8 \text{ кА} \leq 85 \text{ кА};$$

- проверка на термическую стойкость выбранного аппарата:

$$B_{\kappa} \leq I_{терм}^2 \cdot t_{откл}, \quad (109)$$

$$18.8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 155.2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Предварительно выбранный высоковольтный выключатель ВЭБ-УЭТМ-110 УХЛ1 соответствует критериям выбора и проверки.

7.1.2 Выбор и проверка разъединителей 110 кВ

Предварительно для размещения на стороне ВН ГПП выбираем разъединители РПД-110 УХЛ1.

Условия выбора и проверки:

- соответствие напряжению сети [21]:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (110)$$

$$110 \text{ кВ} \leq 110 \text{ кВ};$$

- соответствие номинального тока выбираемого аппарата максимальному току послеаварийного режима:

$$I_{max} < I_n, \quad (111)$$

$$176 \text{ А} < 1250 \text{ А},$$

- проверка на электродинамическую стойкость выбранного аппарата:

$$i_{yd} \leq i_{np.c}, \quad (112)$$

$$28.8 \text{ кА} \leq 70 \text{ кА};$$

- проверка на термическую стойкость выбранного аппарата:

$$B_k \leq I_{np.c}^2 \cdot t_{np.c}, \quad (113)$$

$$18.8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 60.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Предварительно выбранный разъединитель РПД-110 УХЛ1 соответствует критериям выбора и проверки.

7.1.3 Выбор и проверка трансформаторов тока 110 кВ

Предварительно для размещения на стороне ВН ГПП выбираем трансформаторы тока ТВТ-110-І-300/5.

Условия выбора и проверки:

- соответствие напряжению сети:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (114)$$

$$110 \text{ кВ} \leq 110 \text{ кВ};$$

- соответствие номинального тока выбираемого аппарата максимальному току послеаварийного режима:

$$I_{\max} \leq I_{Н.ТТ}, \quad (115)$$

$$176 \text{ А} \leq 300 \text{ А};$$

- проверка на электродинамическую стойкость выбранного аппарата:

$$i_{уд} \leq i_{э\text{лдин.ст}}, \quad (116)$$

$$28.8 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА};$$

- проверка на термическую стойкость выбранного аппарата:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{\text{ном.}}^2 \cdot t_{\text{откл}} = I_T^2 \cdot t_{\text{откл}}, \quad (117)$$

$$18.8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 60.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- проверка по максимальной мощности подключенных ко вторичным цепям приборов:

$$Z_2 \leq Z_{2ном} , \quad (118)$$

в расчетах допустимо принять $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{приб} + R_{пр} + R_{к} , \quad (119)$$

Вторичной нагрузкой рассматриваемого трансформатора тока на стороне ВН ГПП является амперметр с номинальной мощностью прибора равной 0.2 ВА. Найдем значение активного сопротивления:

$$R_{приб} = \frac{S_{приб}}{I_2^2} , \quad (120)$$

$$R_{приб} = \frac{0.2}{5^2} = 0.008 \text{ Ом} .$$

Тогда с учетом полученных данных максимальное сопротивление соединительных проводов будет определяться как:

$$R_{пр} = Z_{2ном} - R_{приб} - R_{к} ,$$

$$R_{пр} = 1.2 - 0.008 - 0.1 = 1.092 \text{ Ом} .$$

Найдем минимальное сечение провода с медной жилой:

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{пр}} , \quad (121)$$

$$s = \frac{0.0175 \cdot 65}{1.092} = 1.042 \text{ мм}^2 .$$

По условию механической прочности, выбираем сечение проводника равное 2.5 мм^2 .

Предварительно выбранный трансформатор тока ТВТ-110-I-300/5 соответствует критериям выбора и проверки.

7.1.4 Выбор и проверка гибких шин

Гибкие шины для соединений в ОРУ 110 кВ выполняем сталеалюминиевым проводом.

Найдем сечение проводника по экономической плотности тока по следующей формуле:

$$s = \frac{I_{\text{раб.ном}}}{j_{\text{э}}}; \quad (122)$$

$$s = \frac{126}{1.1} = 114 \text{ мм}^2.$$

Выбираем провод АС-120/19 мм^2 с длительно допустимым значением тока при нормальных условиях $I_{\text{доп}} = 395 \text{ А}$.

Определим максимальную критическую напряженность электрического поля по формуле:

$$E_0 = 30.3 \cdot m \cdot \left(1 + \frac{0.299}{\sqrt{r_o}} \right); \quad (123)$$

$$E_0 = 30.3 \cdot 0.82 \cdot \left(1 + \frac{0.299}{\sqrt{0.76}} \right) = 33.4 \text{ кВ/м.}$$

Напряженность поля на малом расстоянии от проводника:

$$E = \frac{0.354 \cdot U_{\text{н}}}{r_o \cdot \lg \frac{1.26 \cdot D}{r_o}}; \quad (124)$$

$$E = \frac{0.354 \cdot 115}{0.76 \cdot \lg \frac{1.26 \cdot 300}{0.76}} = 19.9 \text{ кВ/м.}$$

Выполняем проверку на отсутствие коронного разряда:

$$1.07E \leq 0.9E_0; \quad (125)$$

$$21.3 \text{ кВ/м} < 30.0 \text{ кВ/м.}$$

Предварительно выбранный провод АС-120/19 соответствует критериям выбора и проверки.

7.1.5 Выбор ОПН

На стороне 110 кВ подстанции для защиты от импульсных и коммутационных перенапряжений устанавливаем ОПН-110 УХЛ1.

7.1.6 Выбор заземлителей для нейтрали трансформатора

Для заземления нейтрали силового трансформатора выбираем ЗОН-110М-1 УХЛ1.

7.2 Выбор и проверка электрооборудования для размещения в ЗРУ подстанции

7.2.1 Выбор и проверка выключателей 10 кВ

Предварительно для размещения на стороне НН ГПП выбираем высоковольтный выключатель ВВМ-СЭЩ-10-20/1000.

Условия выбора и проверки:

- соответствие напряжению сети:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (126)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- соответствие номинального тока выбираемого аппарата максимальному току послеаварийного режима:

$$I_{max} < I_n, \quad (127)$$

$$962 \text{ A} < 1000 \text{ A},$$

где максимальное значение тока послеаварийного режима определяется по формуле:

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (128)$$

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 10.5 \cdot 2} = 962 \text{ A};$$

- проверка на коммутационную способность:

$$I_{к1}^{(3)} \leq I_{откл.н}, \quad (129)$$

$$6.6 \text{ кА} \leq 25 \text{ кА},$$

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.н.}, \quad (130)$$

$$4.5 \text{ кА} \leq 15.2 \text{ кА},$$

где

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{к1}^{(3)} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}, \quad (131)$$

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 6.6 \cdot e^{\frac{-0.042}{0.058}} = 4.5 \text{ кА},$$

$$i_{a.н.} = \left(\sqrt{2} \cdot \beta_n / 100 \right) \cdot I_{откл.н}, \quad (132)$$

$$i_{a.н.} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{43}{100} \right) \cdot 25 = 15.2 \text{ кА},$$

- проверка на электродинамическую стойкость выбранного аппарата:

$$I_{к1}^{(3)} \leq I_{np.c}, \quad (133)$$

$$6.6 \text{ кА} \leq 25 \text{ кА};$$

$$i_{y\delta} \leq i_{np.c}, \quad (134)$$

$$17.3 \text{ кА} \leq 55 \text{ кА};$$

- проверка на термическую стойкость выбранного аппарата:

$$B_{\kappa} \leq I_{терм}^2 \cdot t_{откл}, \quad (135)$$

$$6.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 57.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Предварительно выбранный высоковольтный выключатель ВВМ-СЭЩ-10-20/1000 соответствует критериям выбора и проверки.

7.2.2 Выбор и проверка трансформаторов тока 10 кВ

Предварительно для размещения на стороне НН ГПП выбираем трансформаторы тока ТОЛ-СЭЩ-10-1000/5.

Условия выбора и проверки:

- соответствие напряжению сети:

$$U_{сети} \leq U_{н}, \quad (136)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- соответствие номинального тока выбираемого аппарата максимальному току послеаварийного режима:

$$I_{\max} \leq I_{н.тт}, \quad (137)$$

$$962 \text{ А} \leq 1000 \text{ А};$$

- проверка на электродинамическую стойкость выбранного аппарата:

$$i_{уд} \leq i_{эдин.ст}, \quad (138)$$

$$17.3 \text{ кА} \leq 85 \text{ кА};$$

- проверка на термическую стойкость выбранного аппарата:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{ном.}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (139)$$

$$6.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 162.3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- проверка по максимальной мощности подключенных ко вторичным цепям приборов:

$$Z_2 \leq Z_{2ном}, \quad (140)$$

в расчетах допустимо принять $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{приб} + R_{пр} + R_k, \quad (141)$$

Вторичной нагрузкой рассматриваемого трансформатора тока на стороне ВН ГПП являются амперметр, ваттметр, варметр, счетчик активной и реактивной энергии суммарной номинальной мощностью 6.8 ВА. Найдем значение активного сопротивления:

$$R_{приб} = \frac{S_{приб}}{I_2^2}, \quad (142)$$

$$R_{приб} = \frac{6.8}{5^2} = 0.272 \text{ Ом}.$$

Тогда с учетом полученных данных максимальное сопротивление соединительных проводов будет определяться как:

$$R_{np} = Z_{2ном} - R_{приб} - R_k,$$
$$R_{np} = 1.2 - 0.272 - 0.1 = 0.828 \text{ Ом.}$$

Найдем минимальное сечение провода с медной жилой:

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{np}}, \quad (143)$$
$$s = \frac{0.0175 \cdot 43}{0.828} = 0.909 \text{ мм}^2.$$

По условию механической прочности, выбираем сечение проводника равное 2.5 мм².

Предварительно выбранный трансформатор тока ТОЛ-СЭЦ-10-1000/5 соответствует критериям выбора и проверки.

Таким же образом выбираем и трансформаторы, устанавливаемые на отходящих линиях.

7.2.3 Выбор и проверка трансформаторов напряжения 10 кВ

Предварительно для размещения на стороне НН ГПП выбираем трансформаторы напряжения типа ЗНОЛ-СЭЦ-1.

Условия выбора и проверки:

- соответствие напряжению сети:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (144)$$
$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- классу точности, достаточный для подключения средств учета электроэнергии;
- проверка по максимальной мощности подключенных ко вторичным цепям приборов:

$$S_{2\Sigma} \leq S_{ном}, \quad (145)$$

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{(\sum S_{приб} \cos \phi)^2 + (\sum S_{приб} \sin \phi)^2} = \sqrt{P_{приб}^2 + Q_{приб}^2}. \quad (146)$$

Вторичной нагрузкой ТН являются счетчики активной и реактивной электрической энергии с суммарной нагрузкой 23 ВА.

$$23 \text{ ВА} \leq 50 \text{ ВА}.$$

Предварительно выбранный трансформатор напряжения ЗНОЛ-СЭЦ-1 соответствует критериям выбора и проверки.

7.2.4 Выбор и проверка жестких шин

Найдем сечение проводника по экономической плотности тока по следующей формуле:

$$s = \frac{I_{\text{раб.ном}}}{j_{\text{э}}}; \quad (147)$$

$$s = \frac{687}{1.1} = 625 \text{ мм}^2.$$

Выбираем шины из алюминиевого сплава с прямоугольным сечением размером 60x10 мм, с $I_{\text{макс.доп}} = 1155 \text{ А}$.

Рассчитаем минимально допустимое сечение шины по термической стойкости:

$$s_{min} = \frac{\sqrt{B_K} \cdot 10^3}{C_T}, \quad (148)$$

$$s_{min} = \frac{\sqrt{6.5} \cdot 10^3}{66} = 38.6 \text{ мм}^2.$$

«Значение силы, действующей на шины во время трехфазного короткого замыкания» [13]:

$$F_{max}^{(3)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} \cdot l \cdot i_{yd}^2 \cdot K_\phi \cdot K_p, \quad (149)$$

$$F_{max}^{(3)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{1} \cdot 2 \cdot 17300^2 \cdot 1 \cdot 1 = 103.7 \text{ Н.}$$

«Значение момента сопротивления поперечного сечения шины» [13]:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (150)$$

$$W = \frac{0.01 \cdot 0.06^2}{6} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

«Значение максимального напряжения в материале проводника» [13]:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}^{(3)} \cdot l}{\lambda \cdot W}, \quad (151)$$

$$\sigma_{max} = \frac{103.7 \cdot 2}{8 \cdot 6 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 4.3 \text{ МПа}.$$

Выполним проверку по электродинамической стойкости:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{доп}, \quad (152)$$

$$4.3 \text{ МПа} \leq 247.1 \text{ МПа},$$

при этом

$$\sigma_{\text{доп}} = 0.7 \cdot \sigma_p, \quad (153)$$

$$\sigma_{\text{доп}} = 0.7 \cdot 353 = 247.1 \text{ МПа}.$$

«Значение момента инерции поперечного сечения проводника» [13]:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (154)$$

$$J = \frac{0.01 \cdot 0.06^3}{12} = 1.8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4.$$

«Значение частоты собственных колебаний» [13]:

$$f_0 = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}}; \quad (155)$$

$$f_0 = \frac{3.14^2}{2 \cdot \pi \cdot 2^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1.8 \cdot 10^{-7}}{2.5}} = 27.9 \text{ Гц}.$$

Поскольку частота собственных колебаний не превышает значения 30 Гц, то отсутствуют условия для возникновения механического резонанса.

7.2.5 Выбор и проверка опорных изоляторов

Основное назначение опорных изоляторов – крепление шин. Предварительно выбираем изоляторы ИОР-10-3.75 УХЛ2.

Условия выбора и проверки:

- соответствие напряжению сети:

$$U_{\text{сети}} \leq U_n, \quad (156)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- не превышение максимальной нагрузки на головку изолятора:

$$F_{\max}^{(3)} \leq F_{\text{дон}}, \quad (157)$$

$$103.7 \text{ Н} < 1607 \text{ Н},$$

где

$$F_{\text{дон}} = 0.6 \cdot F_{\text{разруш}} \cdot \frac{H_u}{H}, \quad (158)$$

$$F_{\text{дон}} = 0.6 \cdot 3750 \cdot \frac{0.12}{0.14} = 1688 \text{ Н}.$$

где

$$H = H_u + b + \frac{h}{2}, \quad (159)$$

$$H = 0.12 + 0.01 + \frac{0.06}{2} = 0.16.$$

Предварительно выбранные опорные изоляторы ИОР-10-3.75 УХЛ2 соответствуют критериям выбора и проверки.

7.2.6 Выбор проходных изоляторов

Предварительно выбираем проходные изоляторы ИП-10/1000-7.5 УХЛ2.

Условия выбора и проверки:

- соответствие напряжению сети:

$$U_{\text{сети}} \leq U_n, \quad (160)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- соответствие протекаемому току:

$$I_{\max} < I_n, \quad (161)$$

$$962 \text{ А} < 1000 \text{ А};$$

- не превышение максимальной нагрузки на головку изолятора:

$$F_{расч} \leq 0.6 \cdot F_{разр}, \quad (162)$$
$$29.9 \text{ Н} < 4500 \text{ Н},$$

где

$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{i_{уд}^2}{a} \cdot l_{из} \cdot 10^{-7}, \quad (163)$$
$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{17300^2}{1} \cdot 2 \cdot 10^{-7} = 29.9.$$

Предварительно выбранные проходные изоляторы ИП-10/1000-7.5 УХЛ2 соответствуют критериям выбора и проверки.

Выбрано и проверено основное электрооборудование для установки на сторонах напряжением 110 и 10 кВ главной понизительной подстанции предприятия.

8 Определение параметров системы заземления подстанции

«Одной из основных характеристик, обеспечивающих электробезопасность, является значение предельно допустимого напряжения прикосновения, которое должно обеспечиваться во всех режимах функционирования объекта» [22].

Минимально возможное время отключения токов короткого замыкания устройствами релейной защиты и высоковольтными выключателями на подстанции составляет 0.047 с, этому времени соответствует максимальное допустимое напряжение прикосновения 500 В.

«Значение напряжения на заземлителе» [22]:

$$U_3 = \frac{U_{np.dop}}{\kappa_{II}}, \quad (164)$$

$$U_3 = \frac{500}{0.221} = 2261 \text{ В},$$

где значение коэффициента напряжения прикосновения:

$$\kappa_{II} = \frac{M\beta}{\left(\frac{l_6 L_z}{a\sqrt{S}}\right)^{0.45}}, \quad (165)$$

$$\kappa_{II} = \frac{0.5 \cdot 0.93}{\left(\frac{7 \cdot 634}{14 \cdot \sqrt{3688}}\right)^{0.45}} = 0.221,$$

значение коэффициент сопротивления тела человека:

$$\beta = \frac{R_q}{R_q + 1.5\rho_{в.с}}, \quad (166)$$

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1.5 \cdot 50} = 0.93.$$

Найденное значение не превышает допустимого 10 кВ. Условие определения сопротивления заземляющего устройства:

$$R_3 < R_{3.дон}. \quad (167)$$

«Число ячеек для расчетной модели заземлителя» [22]:

$$m = \frac{L_2}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1, \quad (168)$$

$$m = \frac{634}{2 \cdot \sqrt{3688}} - 1 \approx 4.$$

«Значение длины полос в расчетной модели» [22]:

$$L_2' = 2\sqrt{S}(m + 1), \quad (169)$$

$$L_2' = 2\sqrt{3688} \cdot (4 + 1) = 607.3 \text{ м.}$$

«Длина сторон ячейки» [22]:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, \quad (170)$$

$$b = \frac{\sqrt{3688}}{4} = 15.2 \text{ м.}$$

«Число вертикальных заземлителей, которые необходимо установить по контуру» [22]:

$$n_g = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{1 \cdot l_g}, \quad (171)$$

$$n_g = \frac{\sqrt{3688} \cdot 4}{1 \cdot 7} \approx 35.$$

«Общая протяженность вертикальных заземлителей» [22]:

$$L_g = l_g \cdot n_g, \quad (172)$$

$$L_g = 7 \cdot 35 = 245 \text{ м.}$$

«Значение относительной глубины погружения вертикальных заземлителей» [22]:

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}}, \quad (173)$$

$$\frac{7 + 0.7}{\sqrt{3688}} = 0.127.$$

«Значение суммарного сопротивления для сложного заземлителя» [22]:

$$R_3 = A \frac{\rho_3}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_3}{L_z + L_g}, \quad (174)$$

$$R_3 = 0.337 \cdot \frac{50}{\sqrt{3688}} + \frac{50}{634 + 245} = 0.33 \text{ Ом,}$$

где

$$A = \left(0.444 - 0.84 \frac{l_g + t}{\sqrt{S}} \right), \quad (175)$$

$$A = (0.444 - 0.84 \cdot 0.127) = 0.337;$$

Суммарное сопротивление сложного заземлителя не превышает 0,5 Ом.

Заключение

Цель работы заключалась в проектировании надежной и экономичной системы электроснабжения производства моторвагонного подвижного состава с использованием современных электрических аппаратов, рассчитанных на максимальный срок эксплуатации, что и было достигнуто. Ввиду высокой продолжительности эксплуатации элементов системы электроснабжения предприятия возникла необходимость проведения ее масштабной реконструкции.

В результате произведенных расчетов были определены расчетные значения нагрузок по каждому из цехов предприятия и по заводу в целом.

Сопоставляя полученные значения приведенных затрат 937 тыс. руб. во втором из рассмотренных вариантов для ремонтно-литейного цеха и 817 тыс. руб. в первом варианте был принят для дальнейшей реализации вариант с меньшим значением приведенных затрат и установкой двухтрансформаторной подстанции с СТ типа ТМГ -1600/10/0,4 и 2 автоматическими низковольтными КУ типа АУКРМ 600 квар и 2 высоковольтными КУ типа УКРП57 мощность по 450 квар каждая.

Для установки на ГПП предприятия выбран для дальнейшего рассмотрения вариант с наименьшим значением приведенных затрат - ТРДН-25000/110/10/10.

Для электроснабжения рассматриваемого предприятия выбрана смешанная схема электроснабжения.

Определены значения токов короткого замыкания на сторонах ВН и НН ГПП предприятия, которые использовались для выбора и проверки высоковольтного электрооборудования.

Определены параметры системы заземления на ГПП.

Список используемых источников

1. Алиев И.И. Электротехника и электрооборудование : учебное пособие для вузов. Саратов: Вузовское образование, 2014. 1199 с.
2. Бартоломей П.А. Информационное обеспечение задач электроэнергетики: учебное пособие, 2-е изд., стер. М.: Флинта, Изд-во Урал. ун-та, 2017. 108 с.
3. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения : электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. 78 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 06.03.2018).
4. Дьяков А.Ф. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учебник для вузов. Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. 543 с.
5. Кобелев А.В., Кочергин С.В., Печагин Е.А. Режимы работы электроэнергетических систем : учебное пособие для бакалавров и магистров направления «Электроэнергетика». Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. 80 с.
6. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Феникс, 2018. 382 с.
7. Кузнецов С.М. Проектирование тяговых и трансформаторных подстанций : учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. 92 с.
8. Кулеева Л.И., Митрофанов С.В., Семенова Л.А. Проектирование подстанции : учебное пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. 111 с.
9. Михайлов В.Е. Современная электросеть. СПб. : Наука и Техника, 2013. 256 с.
10. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей [Электронный ресурс]. Электрон. дан.

Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. 188 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/72323> (дата обращения: 19.02.2018).

11.Ополева Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учеб. пособие. М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2018. 416 с.

12.Пилипенко В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учебно-методическое пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2014. 124 с.

13.Старкова Л.Е. Справочник цехового энергетика : учебно-практическое пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2013. 352 с.

14.Ушаков В.Я. Современные проблемы электроэнергетики [Электронный ресурс] : учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2014. 447 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/34715.html> (дата обращения: 19.02.2018).

15.Ушаков В.Я., Чубик П.С. Потенциал энергосбережения и его реализация на предприятиях ТЭК: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политех. университета, 2015. 388 с.

16.Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Технико-экономические расчеты распределительных электрических цепей: учебное пособие. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 96 с.

17.Шеховцов В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование : учебник, 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2018. 407 с.

18.Chen C., Chen Y., Tan Y., Fang J., Luo F., Kang Y. On the Practical Design of a High Power Density SiC Single-Phase Uninterrupted Power Supply System // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. vol. 13, no. 5, pp. 2704-2716.

19.Kotov O., Kotova E. Reconstruction variants reliability estimation of industrial area power supply system // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk. 2016. pp. 1-4.

20. Lukutin B. V., Shandarova E. B., Fuks I. L. Energy efficiency of photovoltaic power plants in stand-alone power supply systems // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk. 2016. pp. 1-5.

21. Luzyanin I., Petrochenkov A. Regarding developing of program-technical system for analyzing operating modes of power-supply systems in oil producing companies // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg. 2017. pp. 1553-1557.

22. Surya S., Wayne Beaty H. Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition. - McGraw Hill Professional, 2017. 368 p.